

Reik Donner

# Von der Natur lernen – Autonome Kontrolle von Materialflüssen als Weg zur Optimierung logistischer Systeme

## 1 Einführung

Logistische Systeme sind gekennzeichnet durch eine Vielzahl individueller Transportvorgänge, die zumindest zum Teil miteinander wechselwirken bzw. sich sogar gegenseitig behindern. Im Sinne dieser recht allgemeinen Sichtweise umfasst der Begriff der Logistik die verschiedensten Bereiche, die für das Funktionieren unserer Gesellschaft heute nicht mehr wegzudenken sind: den Personen- und Gütertransport, Materialflüsse innerhalb von Fabriken, Lieferbeziehungen zwischen Wirtschaftsunternehmen, Straßen-, Schienen- und Luftverkehr und – bei entsprechend großzügiger Auslegung – auch Informations- und Kommunikationsnetzwerke. Aufgrund der Vielzahl und Bedeutung solcher Systeme ist ihre optimale Funktionalität entscheidend für unser in vielerlei Hinsicht vernetztes Lebensumfeld.

Traditionell erfolgt die Steuerung logistischer Systeme über die Aktionen einer zentralen Kontrollinstanz (Bild 1a), welche für eine optimale Funktion den Zustand der einzelnen Teilsysteme zu jedem Zeitpunkt möglichst genau kennen muss. Ein typisches Beispiel hierfür ist der öffentliche Personennahverkehr, der in der Regel von einer zentralen Leitstelle aus koordiniert wird. Je nach Größe des Netzwerkes sind jedoch für die Bestimmung einer optimalen Systemkonfiguration mitunter so viele Informationen notwendig, dass sich dieses Optimum selbst mit modernen hochleistungsfähigen Computern nicht nur nicht in Echtzeit, sondern häufig überhaupt nicht in vertretbarer Zeit exakt bestimmen lässt. In engem Zusammenhang mit diesem Problem steht auch die Frage der Flexibilität einer zentralen Kontrolle: Wird an irgendeiner Stelle des

Gesamtsystems ein Transportweg blockiert, so muss wiederum der gegenwärtige Zustand aller anderen Teilsysteme zur Ermittlung des neuen Systemoptimums benutzt werden. Da laufende Transportvorgänge sich jedoch nicht immer ohne Weiteres stoppen lassen, ist im Falle plötzlich auftretender Störungen ein allmähliches Umschalten vom alten auf das neue Optimum nicht möglich, sodass sich eine Ausbreitung von Störungen (z. B. Staus im Straßenverkehr) und damit zusätzliche Ineffizienzen des Systems im Allgemeinen nicht vermeiden lassen.

Um die genannten Schwierigkeiten zu umgehen, wird seit geraumer Zeit in den verschiedensten Bereichen der Logistik versucht, dezentrale Steuerungsstrategien zu entwickeln. Im Gegensatz zu zentralen Konzepten führen solche Ansätze nicht notwendigerweise immer zu einem globalen Systemoptimum, sind dafür jedoch deutlich weniger störanfällig. Die grundlegende Idee ist, dass bestimmte Teilsysteme (z. B. Ampelanlagen) autonom mittels möglichst einfacher vordefinierter Regeln anhand des aktuellen Zustands ihrer unmittelbaren Umgebung entscheiden können, wie die nachfolgenden Transportprozesse zu organisieren sind (Bild 1b). Vorbilder für die Entwicklung dezentraler Steuerungskonzepte finden sich an vielen Stellen in der Natur, etwa bei der Selbstorganisation intrazellulärer Transportvorgänge oder dem koordinierten Agieren von Ameisenvölkern, welche jeweils einen erstaunlich hohen Effizienzgrad aufweisen. Neben der hohen Flexibilität entsprechender Ansätze besteht ein weiterer natürlicher Vorteil darin, dass nur wenige Informationen zur Entscheidungsfindung notwendig sind, sodass eine Echtzeit-Steuerung möglich wird. Daher ist

*Die Natur liefert zahlreiche Beispiele für hochgradig effiziente Transportprozesse. Hinsichtlich der Komplexität und Vielfalt dieser häufig gleichzeitig ablaufenden Prozesse offenbaren sich dabei verblüffende Parallelen zu Problemstellungen der technischen Logistik. Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, die Idee einer selbstorganisierten Steuerung von Transportvorgängen, wie man sie in biologischen Systemen in der Regel vorfindet, auf technische Systeme zu übertragen. Dieser Aufsatz fasst aktuelle Forschungsansätze auf diesem Gebiet zusammen und präsentiert als potenzielles Anwendungsbeispiel eine neuartige dezentrale Strategie für die Kontrolle innerstädtischer Straßenverkehrsnetzwerke. Insbesondere im Falle kurzfristig auftretender Störungen ist der vorgestellte Ansatz aufgrund seiner Flexibilität in der Lage, den drohenden Zusammenbruch von Teilen des Netzwerkes zu verhindern oder zumindest deutlich zu verzögern.*

*Nature offers numerous examples of highly efficient transport processes. The complexity and multiplicity of typically simultaneous processes in such systems display surprising similarities to the problems of technical logistics. This observation has motivated transfers of concepts for the autonomous control of transport processes, as often present in biological systems, to technical systems. This paper summarises some recent results in this field and presents a novel decentralised strategy for traffic control in urban road networks as a potential application. Especially in the case of sudden disturbances to the traffic flows, the flexibility of the presented approach enables the breakdown of parts of the networks to be halted or at least delayed significantly.*

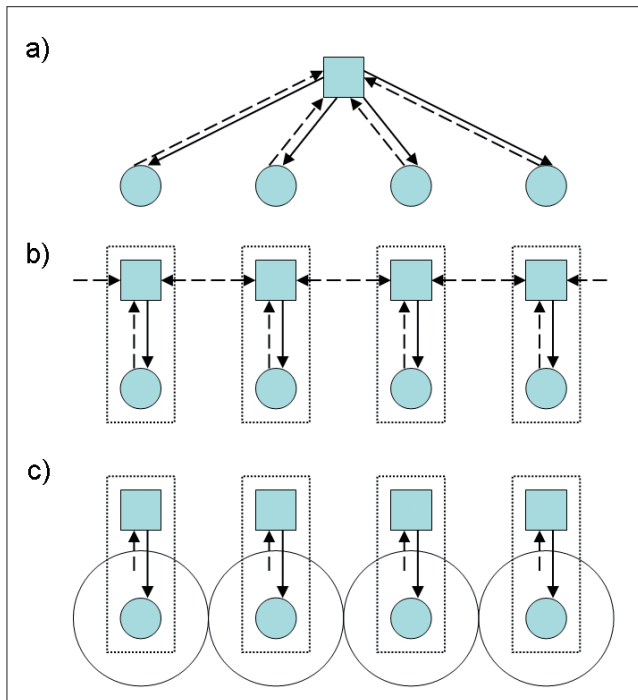


Bild 1. Schematische Darstellung verschiedener Steuerungsarchitekturen: a) zentrale Steuerung, b) dezentrale Steuerung mit Informationen von benachbarten Netzwerkknoten, c) vollständig autonome Steuerung (z. B. unter Verwendung der RFID-Technologie). Kreise symbolisieren die einzelnen Transportmittel bzw. Steuerungsanlagen, während Rechtecke die zugehörigen Kontrollinstanzen darstellen. Gestrichelte Pfeile geben die Informationsflüsse an, durchgezogene Pfeile repräsentieren die Steuerimpulse.

es nicht verwunderlich, dass dezentrale Regelkonzepte immer häufiger ihren Weg in die praktische Anwendung finden. Besonders deutlich ist diese Entwicklung zur Praxisreife derzeit im Bereich der Produktionslogistik zu sehen, insbesondere bei der Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme wie Fabrikanlagen [1 bis 3].

Mit der Idee dezentraler Steuerungsmechanismen in enger Verbindung steht der Begriff der autonomen Kontrolle. Nach HÜLSMANN und WINDT ist die autonome Kontrolle logistischer Systeme charakterisiert durch die Fähigkeit (einzeln) logistischer Objekte, selbstständig Informationen zu verarbeiten und Entscheidungen zu fällen und auszuführen [1]. Der Begriff des logistischen Objektes ist hierbei recht allgemein zu fassen und kann je nach konkretem Anwendungsfall die zu transportierenden Objekte, die Transportmittel oder lokale Kontrollinstanzen zur Steuerung miteinander in Wechselwirkung stehender Transportvorgänge bzw. Kombinationen dieser drei Gruppen von Objekten beinhalten. Im Bereich der Produktionslogistik setzt sich beispielsweise seit einigen Jahren zunehmend die sogenannte RFID-Technologie (radio frequency identification) durch, welche es ermöglicht, die Position aller in einem System bewegten Transportgüter nahezu vollständig und in Echtzeit zu erfassen. Hierdurch können Produkte und Infrastruktur effizient miteinander kommunizieren (Bild 1c), was insbesondere bei führerlosen Transportmitteln eine autonome Entscheidungsfindung über die Wegewahl ermöglicht [4].

## 2 Stabilität von Materialflüssen in Netzwerken

Bei der Optimierung von Materialflusssystemen ist es häufig nicht möglich, alle denkbaren Formen der Dynamik eines Systems vorab zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere deshalb bemerkenswert, weil sich viele Probleme, die in der Praxis in Form von verschiedensten Instabilitäten auftreten, bereits aus der Struktur der zugrunde liegenden Transportsysteme erklären lassen. Mithilfe von Ansätzen aus der Theorie komplexer Systeme ist man heute in der Lage, entsprechende Untersuchungen bereits im Designprozess eines Transportsystems vorzunehmen und hierdurch ggf. potenzielle strukturelle Schwächen zu vermeiden. Nur in den seltensten Fällen lassen sich dabei jedoch alle potenziell relevanten Einflussfaktoren berücksichtigen.

Instabilitäten in Materialflüssen treten in vielfältigen Formen auf. Ein klassisches Beispiel ist der Forrester- oder Bullwhip-Effekt [5], der die aus Prognoseunsicherheiten über die künftige Produktnachfrage (bzw. das entsprechende Rohstoffangebot) resultierende Aufschaukelung von zeitlichen Variationen von Lagerbeständen entlang einer industriellen Lieferkette beschreibt. Generell ist festzustellen, dass auch in anderen Bereichen die Unvorhersagbarkeit bestimmter exogener Einflussgrößen eines der Hauptprobleme für die Steuerung logistischer Systeme darstellt. Neben diesen kaum vermeidbaren Problemen treten jedoch auch weitere Arten von Instabilitäten auf, die ihre Ursache ausschließlich in der Struktur des Systems besitzen und daher durch eine geeignete Planung und Steuerung weitgehend verhindert werden könnten. Hierzu zählen Rückkopplungseffekte zwischen Material- und Informationsflüssen (z. B. Bestellungen und Lieferbeziehungen) sowie eine mangelhafte logistische Synchronisation der einzelnen Teilsysteme [6]. Letztere kann dabei sowohl durch unangepasste zeitliche Abläufe als auch durch eine suboptimale Wahl des Volumens der einzelnen Transportprozesse hervorgerufen werden und unter ungünstigen Umständen selbst bei vollständig bekannten Rahmenbedingungen eine irreguläre zeitliche Dynamik der relevanten Prozesse bewirken.

Eine quantitative Charakterisierung sowie eine darauf aufbauende Performance-Analyse von Netzwerkflüssen erfordert aufgrund der Komplexität der Dynamik der einzelnen Systemkomponenten neuartige mathematische Ansätze. Hierzu zählen Methoden, die das Zeitverhalten logistischer Kenngrößen auf seine grundlegenden dynamischen Muster reduzieren (z. B. durch geeignete Diskretisierung) bzw. die Wiederkehr bestimmter zeitlicher Strukturen statistisch erfassen (Rekurrenzanalyse). Mithilfe eines Simulationsmodells konnte gezeigt werden, dass sich auf Basis der genannten Methoden neuartige Parameter definieren lassen, die einen Vergleich der Dynamik für verschiedene Produktionsstrategien und damit eine Evaluation auf operationeller wie auch strategischer Ebene (d. h. bei der Produktionsplanung wie auch bereits im Design von Logistiksystemen) ermöglichen [7, 8]. Je genauer die Rahmenbedingungen der künftigen Produktion bekannt sind, desto besser lassen sich auf diese Weise geeignete Produktions- und Transportstrukturen bzw. Steuerungskonzepte bereits im Vorfeld eingrenzen.

### 3 Steuerung von Materialflüssen an Knotenpunkten

Für die mathematische Darstellung eines autonomen Steuerungskonzeptes lassen sich logistische Systeme vielfach allgemein als eine Menge von Transportwegen beschreiben, welche sich an bestimmten räumlichen Punkten kreuzen bzw. verzweigen. Für auf den verschiedenen Routen ablaufende Transportprozesse besteht hierdurch an den genannten Punkten das Problem der optimalen Steuerung. Ziel ist es dabei in der Regel, die Gesamt-wartezeit und damit die Gesamtdauer aller Transportvor-gänge im Netzwerk zu minimieren.

Bei einem geringen Verkehrsaufkommen ist es häufig von Vorteil, die verschiedenen Materialflüsse an Knotenpunkten objektweise abzufertigen, wobei geeignete Priorisierungs-strategien zur Anwendung kommen, die die Reihenfolge der Abfertigung im Falle von Warteschlangen bestimmen. Typische Ansätze hierfür sind beispielsweise das FIFO-Konzept („First In – First Out“), d. h. die Abfertigung in der Reihenfolge der Ankünfte, oder das „Rechts-vor-Links“-Konzept im innerörtlichen Straßenverkehr abseits der Hauptverbindungsachsen. Die genannten Strategien stellen bereits rein dezentrale Konzepte dar, sind jedoch nur so lange sinnvoll einsetzbar, wie das Gesamtverkehrsauf- kommen nicht zu stark wird.

Bei höherem Verkehrsaufkommen (z. B. in Innenstädten) lässt sich mathematisch zeigen, dass eine koordinierte, grup-penweise Abfertigung der verschiedenen Materialflüsse von Vorteil ist und die Gesamt-wartezeit reduziert. Im Straßen-verkehr wird dies bereits seit vielen Jahrzehnten in Form eines kolonnenweisen Abfertigungs mittels Lichtsignalan-lagen realisiert. Im Gegensatz zur objektweisen Abfertigung stellt die gruppenweise Abfertigung von Materialflüssen in Netzwerken jedoch ein komplexes Optimierungsproblem dar, für welches die aktuellen Gegebenheiten innerhalb des kompletten Systems Berücksichtigung finden müssen. Die heute gängigen zentralen Verfahren (z. B. umlaufzeitbasier-te Lichtsignalsteuerungen) stellen häufig nur eine Näherung an dieses Optimum dar. Umgekehrt bergen traditionelle dezentrale Steuerungskonzepte häufig das Risiko von Instabilitäten, welche zu massiven Stauphänomenen führen können [9, 10]. Im Folgenden soll ein neuartiger Ansatz zur Selbstorganisation von Materialflüssen in Netzwerken vor-gestellt werden, der das Potenzial hat, die genannten Probleme zu überwinden, und damit helfen kann, durch eine flexible Reaktion auf den konkreten Verkehrszustand zusätzliche Kapazitäten innerhalb eines vorhandenen Netzwerks zu erschließen.

### 4 Bio-inspirierter Ansatz zur Selbstorganisation von Materialflüssen

Betrachtet man Gruppen von Fußgängern oder Ameisen, welche eine Engstelle auf ihrem Weg in verschiedenen Richtungen passieren wollen (Bild 2), so kann man beob- achten, dass sich je nach Größe der wartenden Gruppen ein oszillierendes Verhalten einstellt: Erst wird ein Teil der auf einer Seite wartenden Gruppe die Engstelle passieren, dann ein Teil der anderen Gruppe [11]. Eine mathematische Erklärung dieses Selbstorganisations-Phänomens ist mit Hilfe quantitativer Modelle aus dem Bereich der Soziologie möglich. Rein qualitativ kann man feststellen: Das geschil- derte Verhalten sorgt dafür, dass die wartenden Gruppen nie zu groß werden, sondern immer in geeigneter Art und Weise

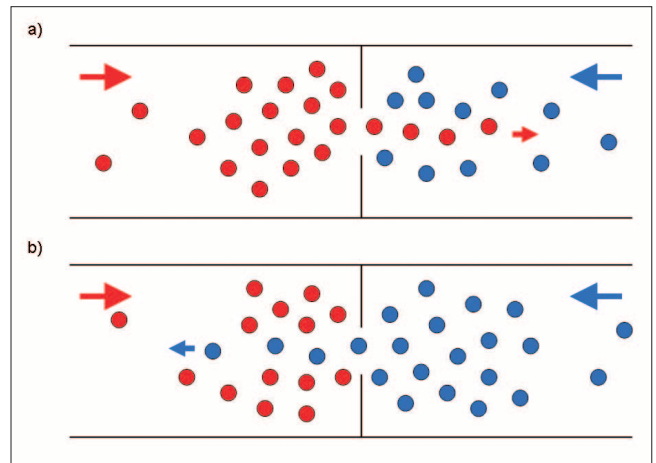


Bild 2. Schematische Darstellung zweier sich in unterschiedlichen Richtungen (symbolisiert durch verschiedene Farben) bewegender Fußgängerströme an einer Engstelle. Durch zeitliche Variationen in der Zahl der jeweils wartenden Personen stellt sich mit der Zeit von selbst ein oszillierendes Verhalten der Durchlassrichtung ein, welches an eine Ampelsteuerung erinnert (nach [11]).

„ausbalanciert“ bleiben. Hierfür sorgen im Wesentlichen zwei Kräfte:

Der wechselseitige „Druck“ zwischen den beiden wartenden Gruppen bewirkt, dass sich tendenziell eher die größere Gruppe in Bewegung befindet. Zusätzlich sorgt die „Trägheit“ der einzelnen Individuen dafür, dass sich eine einmal in Bewegung gesetzte Gruppe nur verhältnismäßig schwer wieder durch die andere stoppen lässt. Beide Faktoren tragen gemeinsam dazu bei, dass die Gesamt-wartezeit klein bleibt, lassen sich jedoch nicht immer opti- mal miteinander verbinden. Die *Permeabilität* (Durch- lassigkeit) der Engstelle in den beiden möglichen Rich- tungen ist daher durch eine geeignet gewichtete Kom- bination beider Kräfte bestimmt, die als Netto-Kraft bzw. Prioritätsfunktion für die beiden Richtungen aufgefasst werden kann. Ist diese stark positiv, so bewegt sich nur die eine Gruppe, ist sie stark negativ, entsprechend die andere.

Zwischen zwei Fußgängergruppen an einer Engstelle und zwei allgemeinen Materialflüssen an einem Knotenpunkt besteht eine weitreichende Analogie. Mithin ist es nahelie- gend, eine Selbstorganisation der Flüsse ähnlich zu den oben geschilderten Beobachtungen anzustreben. Ein Unter- schied besteht jedoch in der Spezifikation des Zusam- menhangs zwischen der Netto-Kraft und der Durchlässig- keit für die jeweiligen Materialflüsse. Bei Fußgängern zie- hen kleinere Kollisionen bzw. die gleichzeitige Bewegung von Individuen in verschiedenen Richtungen üblicherweise keine gravierenden Folgen nach sich. Der entsprechende Zusammenhang lässt sich daher mathematisch gut durch eine sogenannte logistische Funktion modellhaft beschrei- ben [12] (s. Bild 3). Im Gegensatz dazu sollen im Straßen- verkehr, aber auch in anderen logistischen Systemen, Kollisionen möglichst vermieden werden, d. h., die Engstelle bzw. Kreuzung darf immer nur für genau eine der beiden Bewegungsrichtungen passierbar sein. Die zugehö- rige Permeabilitätsfunktion muss daher in Abhängigkeit von der Netto-Kraft durch eine Sprungfunktion bzw. eine geeig- nete Kombination von Sprungfunktionen für beide Richtungen beschrieben werden [13, 14]. Die in diesem Fall nur noch auftretenden Werte „0“ und „1“ (s. Bild 3) lassen sich dann als die Rot- und Grün-Zeiten einer Ampelanlage



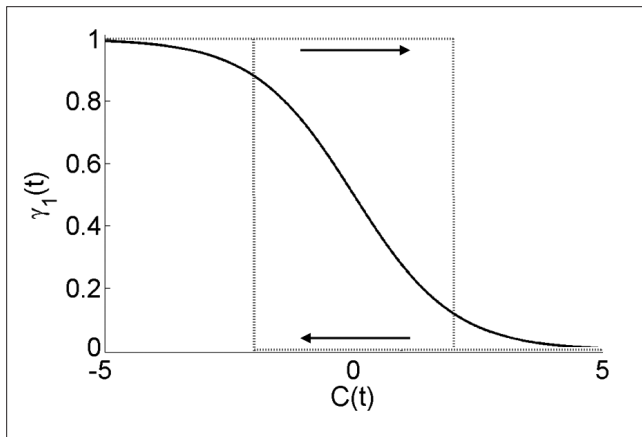


Bild 3. Verlauf einer möglichen Permeabilitätsfunktion  $\gamma_1(t)$  für die Gruppe 1 für den Fall Fußgängerverkehr (logistische Funktion, durchgezogen) bzw. Straßenverkehr (Sprungfunktionen, gestrichelt) in Abhängigkeit vom Wert der Netto-Kraft  $C(t)$  [13].

im Straßenverkehr interpretieren. Für kompliziertere Knotenpunkte, die mehr als zwei „Ampelphasen“ benötigen, lässt sich der vorgestellte Ansatz relativ problemlos verallgemeinern.

## 5 Selbstorganisation und Synchronisation in Materialflussnetzwerken

Im Falle von Objektströmen innerhalb eines Transportnetzwerks ist es eine plausible Annahme, dass eine „optimale“ Kontrolle der Knotenpunkte dazu führen sollte, dass das Schaltverhalten an Kreuzungen und Zusammenflüssen möglichst netzwerkweit koordiniert ist. Das Entstehen einer solchen Koordination kann im Falle eines intervallartigen Wechsels zwischen verschiedenen Flussrichtungen als Synchronisationsphänomen verstanden werden.

Das Auftreten der verschiedensten Formen von Synchronisation in komplexen Netzwerken wurde in den vergangenen Jahren in einer unüberschaubaren Vielzahl von Arbeiten für verschiedenste Modellsysteme sowie reale Problemstellungen untersucht [15]. Dabei stellte sich heraus, dass vielfach kein vollständiger Informationsaustausch zwischen allen Knoten bzw. ein externer „Schrittmacher“ notwendig ist, sondern bereits eine hinreichend starke Wechselwirkung zwischen benachbarten Teilsystemen ausreicht, um einen Zustand globaler Koordination zu erreichen. Diese Beobachtung motivierte zahlreiche Studien zur Synchronisierbarkeit von Materialflussnetzwerken, etwa im Bereich Produktionslogistik oder Straßenverkehr. Im Gegensatz zur *logistischen* Synchronisation, worunter häufig bereits sehr allgemein die Koordination verschiedener Teilprozesse verstanden wird (s. o.), wird der hier auftretende *physikalische* Synchronisationsbegriff als ein *Prozess* definiert, bei dem sich die Dynamik miteinander verbundener Teilsysteme durch geeignete Wechselwirkungen sukzessive aneinander angleicht. Bei der Optimierung von Materialflussnetzwerken sind dabei insbesondere die Formen der *Phasen-Synchronisation* bzw. der *Event-Synchronisation* von Interesse, bei denen die Schaltvorgänge an verschiedenen Knotenpunkten mit einem konstanten optimalen Versatz zueinander erfolgen [13, 14, 16].

Erste Studien [13, 14] haben gezeigt, dass eine sukzessive Anwendung des oben vorgestellten Ansatzes für die

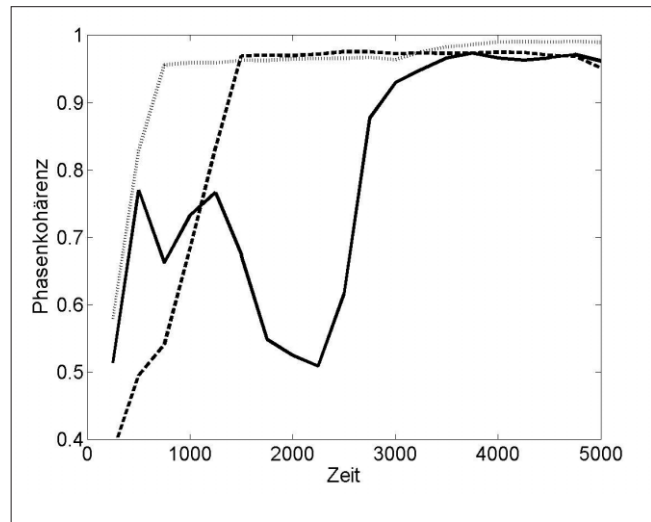


Bild 4. Entwicklung der Phasenkohärenz des Schaltverhaltens von Lichtsignalanlagen (in willkürlichen Zeiteinheiten) in einem regelmäßigen Netzwerk aus 5 x 5 Kreuzungen für drei verschiedene Spezifikationen der Permeabilitätsfunktion aus Bild 3. In allen drei Situationen wird mit einem anfänglich leeren Netzwerk begonnen und dieses sukzessive mit zufällig gewählten festen Verkehrsströmen auf den 20 Einfallsstraßen gefüllt, wobei die statistischen Abbiegewahrscheinlichkeiten an den 25 Kreuzungen vorgegeben wurden. Hohe Werte des dargestellten Parameters nahe 1 zeigen an, dass sich nach geraumer Zeit feste Schaltperioden mit einem festen zeitlichen Versatz zwischen den Kreuzungen einstellen.

Selbstorganisation aller Materialflüsse im Netzwerk bei geeigneter Spezifikation der Permeabilitätsfunktion tatsächlich durch Synchronisation zu einer kollektiven Dynamik führen kann (s. Bild 4). Es ist interessant zu bemerken, dass die Synchronisation von Lichtsignalanlagen bereits 1965 durch LITTLE erstmals für die Optimierung von Verkehrsflüssen vorgeschlagen wurde. Anstelle einer dabei vorgesehenen, durch externe Kontrolle erzwungenen Synchronisation ist diese jedoch bei der vorgestellten autonomen Steuerungsstrategie ein „Nebenprodukt“ der lokalen Schaltregeln.

## 6 Fazit und Ausblick

Der Bedarf von Industrie und Gesellschaft an neuartigen Optimierungsansätzen für den immer wichtiger werdenden Bereich der Logistik wird auch in den kommenden Jahren intensive Forschungen nach sich ziehen. Da neben einem möglichst hohen Materialdurchsatz auch Eigenschaften wie Flexibilität und Robustheit zunehmend an Bedeutung gewinnen, ist anzunehmen, dass dabei der dezentralen bzw. autonomen Kontrolle der Transportprozesse eine Schlüsselrolle zukommen wird. An vielen Stellen haben industrielle Partner das entsprechende Potenzial bereits erkannt und arbeiten eng mit Forschungseinrichtungen an der Weiterentwicklung der entsprechenden Konzepte zur Praxisreife zusammen.

In diesem Artikel haben wir ein neuartiges, durch biologische Selbstorganisationsprozesse inspiriertes dezentrales Steuerungskonzept für Verzweigungen und Kreuzungspunkte von Materialflüssen in Netzwerken vorgestellt. Neben dem Einsatz in Stückgutförderanlagen (z. B. in Fabriken oder auf Flughäfen) ist dieser Ansatz speziell für die Anwendung im Bereich der Lichtsignalsteuerung im Straßenverkehr interessant. Tatsächlich sind hierfür jedoch

Modifikationen notwendig, etwa die Antizipation des künftigen Verkehrszustands durch Kommunikation mit vorgelagerten Sensoren und die Kombination mit einer übergeordneten Heuristik, die bei sehr starkem Verkehrsaufkommen die Blockade ganzer Straßensegmente verhindert [10]. Gegenwärtige Forschungen an der Professur für Verkehrsökonomie und -modellierung der TU Dresden beschäftigen sich damit, ein entsprechend modifiziertes Konzept weiter zu spezifizieren und zur praktischen Anwendbarkeit weiterzuentwickeln.

### Danksagung

Wertvolle Beiträge zum vorgestellten Forschungsprojekt an der Professur für Verkehrsökonomie und -modellierung haben Dr. STEFAN LÄMMER sowie Professor DIRK HELBING (mittlerweile an der ETH Zürich) geleistet, denen an dieser Stelle für zahlreiche inspirierende Diskussionen gedankt sein soll. Die in diesem Aufsatz zusammengefassten Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Volkswagen-Stiftung und die Daimler-Benz-Stiftung finanziell gefördert.

### Literatur

- [1] Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Berlin: Springer, 2007
- [2] Haasis, H.-D.; Kreowski, H.-J.; Scholz-Reiter, B. (Hrsg.): Dynamics in Logistics. Berlin: Springer, 2008

- [3] Seidel, T.; Donner, R.: Kooperative Transportprozesse – ein Weg zu „sozialen“ Gütern in der Logistik. In: Wiss. Z. TU Dresden **58** (2009) 1 – 2
- [4] Seidel, T.; Donner, R.: Potentials and limitations of RFID applications in packaging industry: A case study. In: Int. J. Manufacturing Technology and Management (eingereicht)
- [5] Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press, 1961
- [6] Donner, R.; Hinrichs, U.; Scholz-Reiter, B.: Mechanisms of Instability in Small-Scale Manufacturing Networks. In: [2]. S. 161 – 168
- [7] Donner, R.; Scholz-Reiter, B.; Hinrichs, U.: Nonlinear Characterization of the Performance of Production and Logistics Networks. In: J. Manufact. Syst. (im Druck)
- [8] Donner, R.; Hinrichs, U.; Scholz-Reiter, B.: Symbolic Recurrence Plots: A New Quantitative Framework for Performance Analysis of Manufacturing Networks. In: Eur. Phys. J. Special Topics **164** (2008), S. 85 – 104
- [9] Kumar, P. R.; Seidman, T. I.: Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. In: IEEE Trans. Autom. Control **35** (1990) 3, S. 289 – 298
- [10] Lämmer, S.; Helbing, D.: Self-control of traffic lights and vehicle flows in urban road networks. In: J. Stat. Mech. Theor. Exp. (2008), P04019
- [11] Helbing, D.; Molnár, P.: Social force model for pedestrian dynamics. In: Phys. Rev. E **51** (1995) 5, S. 4282 – 4286
- [12] Helbing, D.; Siegmeier, J.; Lämmer, S.: Self-Organized Network Flows. In: Netw. Heterog. Med. **2** (2007) 2, S. 193 – 210
- [13] Donner, R.: Multivariate analysis of spatially heterogeneous phase synchronisation in complex systems: Application to self-organised control of material flows in networks. In: Eur. Phys. J. B **63** (2008) 3, S. 349 – 361
- [14] Donner, R.; Lämmer, S.; Helbing, D.: Self-organized optimization and synchronization of material flow networks with decentralized control. In: Kyamakya, K. (Hrsg.): Proceedings of INDS'08 – First International Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization 2008 (INDS'08). Aachen: Shaker, 2008. S. 87 – 96
- [15] Arenas, A.; Diaz-Guilera, A.; Kurths, J.; Moreno, Y.; Zhou, C.: Synchronization in Complex Networks. In: Physics Reports **469** (2008) 3, S. 93 – 154
- [16] Lämmer, S.; Kori, H.; Peters, K.; Helbing, D.: Decentralised control of material or traffic flows in networks using phase-synchronisation. In: Physica A **363** (2006) 1, S. 39 – 47

Manuskripteingang: 19.8.2008  
Angenommen am: 3.11.2008



**Donner, Reik**

Dr. rer. nat.

Studium Physik von 1997 bis 2002 an der Universität Potsdam ♦ 2007 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaft und Verkehr, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden